

AR 双谱的电梯机械故障诊断

陈建灿, 刘晓梅

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过采集电梯运行时的加速度振动信号,建立 AR 时间序列模型,分析 AR 双谱图、双谱等高线,以及双谱对角切片,诊断电梯机械故障.研究表明:在电梯正常工作和故障时的双谱存在明显的差异,AR 双谱表现出了不同的特征,可以作为电梯机械故障的诊断方法.

关键词: 电梯; AR 双谱; 故障诊断; 时间序列模型

中图分类号: TH211.6; TH165.3

文献标志码: A

目前,广泛使用的升降电梯主要有曳引式和液压式两种,高层楼宇多使用曳引式电梯.曳引式电梯通过安全装置,防止轿箱因钢缆断裂、制动失灵等原因造成的坠落.电梯主要是由机械系统、拖动系统和电气控制部分组成.拖动系统也可以归入电气系统,所以电梯的故障就可以分为机械故障和电气故障两大类.高阶谱分析能有效地消除信号中的高斯噪声,在反映信号能量的同时,还保留信号的相位信息,因此能定量描述非线性相位耦合.本文通过分析正常和故障情况下的振动信号,研究其非线性特征及区别,从而实现故障模式识别和故障诊断.

1 AR 模型和 AR 双谱

1.1 AR 模型^[1-4]

假设 $a(t)$ 为电梯输出振动信号中的随机信号受到均值为零的非高斯白噪声的干扰, $x(t)$ 为零均值有色非高斯噪声,则其 AR 模型为

$$x(t) + \sum_{i=1}^p \partial_i x(t-i) = a(t), \quad t = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

式(1)中: $\partial_i (i=1, 2, \dots, p)$ 为自回归系数; p 为自回归模型的阶数.

用滞后量 m 和 n 表示变量 $x(t)$ 的三阶累积量函数 $c(m, n)$, 有

$$c(m, n) = E[x(t)x(t+m)x(t+n)]. \quad (2)$$

式(1)用 $x(t)$ 的三阶累积量表示为 $c(-m, -n) + \sum_{i=1}^p \partial_i c(i-m, i-n) = \beta(m, n), m \geq 0, n \geq 0$.

$\delta(m, n)$ 为二维的脉冲函数.

令 $m=n$, 可得 $\{x(t)\}$ 三阶自相关 $c(m, n)$ 的对角切片值. 当 $m=n=1, 2, \dots, p$, 可得矩阵方程^[5-6] 为

$$\mathbf{CA} = \mathbf{B}. \quad (3)$$

式(3)中: $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c(0,0) & c(1,1) & \cdots & c(p,p) \\ c(-1,-1) & c(0,0) & \cdots & c(p-1,p-1) \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ c(-p,-p) & c(-p+1,-p+1) & \cdots & c(0,0) \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = [\beta, 0, 0, \dots, 0]^T$; $\mathbf{A} = [1, a_1, a_2, \dots, a_p]^T$, a_p 是 p 个待估计的 AR 模型参数.

收稿日期: 2012-10-17

通信作者: 刘晓梅(1970-), 女, 副教授, 主要从事时间序列高阶谱分析的研究. E-mail: liuxm@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975098); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01213)

1.2 AR 双谱

随机量 $x(t)$ 的双谱为三阶矩的二维 Fourier 变换^[1,7-8]，即

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\omega_1, \omega_2) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(m, n) \exp(-j(\omega_1 m + \omega_2 n)) = \\ &F(\omega_1)F(\omega_2)F^*(\omega_1 + \omega_2). \end{aligned} \tag{4}$$

式(4)中： $\omega = 2\pi f$ ； $|\omega_1| \leq \pi$ ； $|\omega_2| \leq \pi$ ； $|\omega_1 + \omega_2| \leq \pi$ ； $F(\omega)$ 为 $x(t)$ 的 Fourier 变换； $F^*(\omega)$ 为 $F(\omega)$ 的共轭复数。

双谱 $\mathbf{B}(\omega_1, \omega_2)$ 为复函数^[9]，可表示为

$$\mathbf{B}(\omega_1, \omega_2) = \beta H(\omega_1)H(\omega_2)H^*(\omega_1 + \omega_2). \tag{5}$$

式(5)中： $H(\omega)$ 为 $X(n)$ 在三阶统计意义下的 AR 模型； $H^*(\omega_1 + \omega_2)$ 为 $H(\omega_1 + \omega_2)$ 的共轭复数。

当 $\omega_1 = \omega_2$ 时，可得双谱的一维对角切片谱，其定义^[10]为

$$\begin{aligned} \mathbf{BD}_{3,y}(\omega) &= \mathbf{B}(\omega_1 = \omega_2) = \\ &\beta H(\omega)^2 H^*(2\omega). \end{aligned} \tag{6}$$

2 实验原理

实验采用福建泉州中侨富士电梯有限公司提供的实验电梯。在轿厢运动的垂直方向、前后方向分别安装的传感器，采集电梯在正常工作和故障状态下的加速度振动信号，并对其进行分析、处理。实验电梯的工作状态有 3 种：正常运行（无故障）；故障 1（绳头张紧）；故障 2（导靴左右夹紧）。在实验中设置采样频率为 1 024 Hz，读取频率为 512 Hz。利用 NI 软件^[11] 构建检测平台，使用 PCI-604 数据采集卡、加速度传感器、信号放大器等设备进行数据采集。

3 实验数据分析

对采集到的振动加速度信号进行预处理后分析，数据长度为 1 024 点，绘制出电梯正常工作和故障情况下的振动加速度信号的双谱图、等高线图及其对角切片图。垂直方向加速度振动信号双谱图、双谱等高线图、及双谱对角切片图，如图 1~3 所示。前后方向加速度振动信号双谱图、双谱等高线图、及双谱对角切片，如图 4~6 所示。

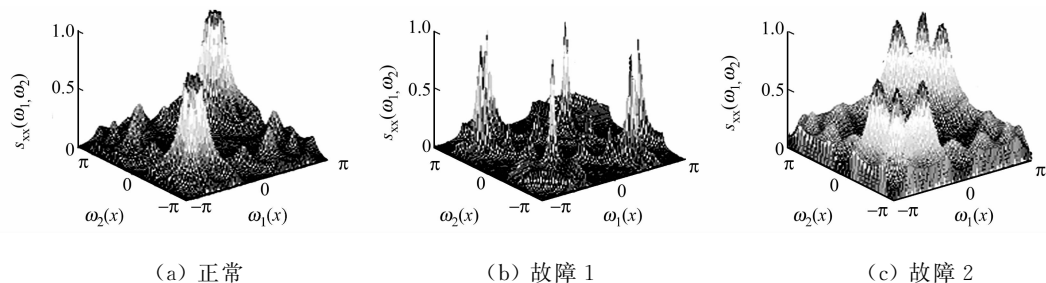


图 1 垂直方向加速度振动信号的双谱图

Fig. 1 Double spectrum of the acceleration vibration signal in the vertical direction

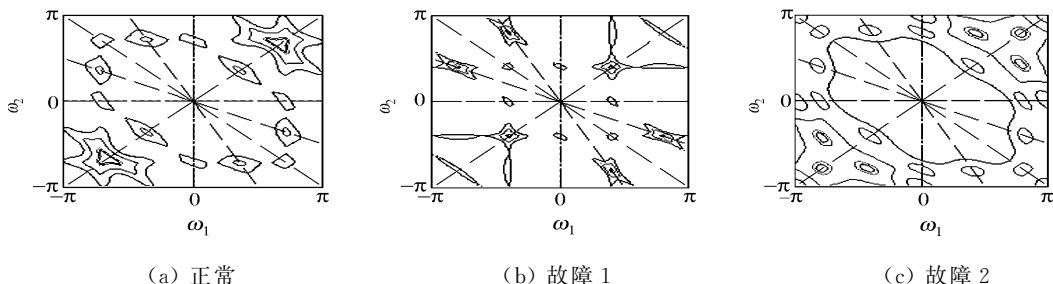
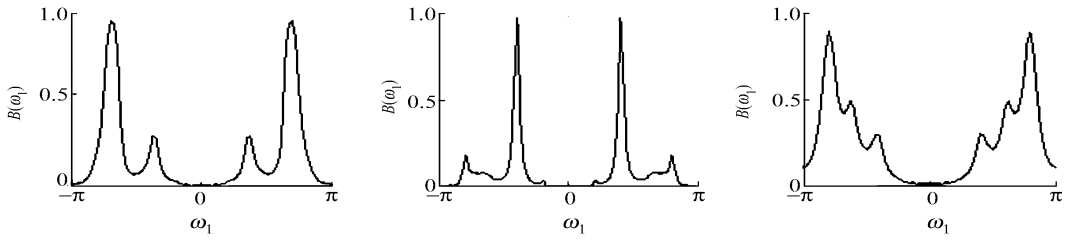


图 2 垂直方向的双谱等高线图

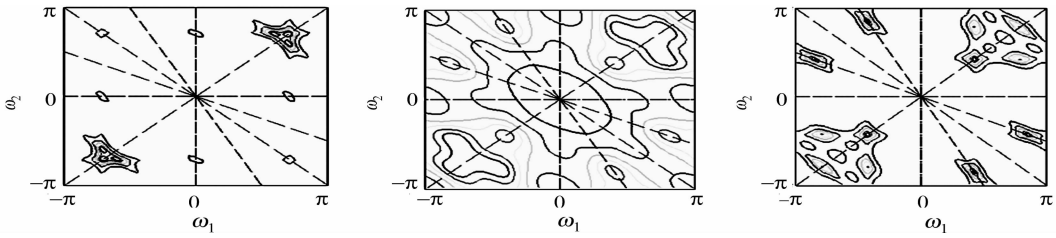
Fig. 2 Dual spectrum contour in the vertical direction



(a) 正常 (b) 故障 1 (c) 故障 2

图 3 垂直方向的双谱对角切片图

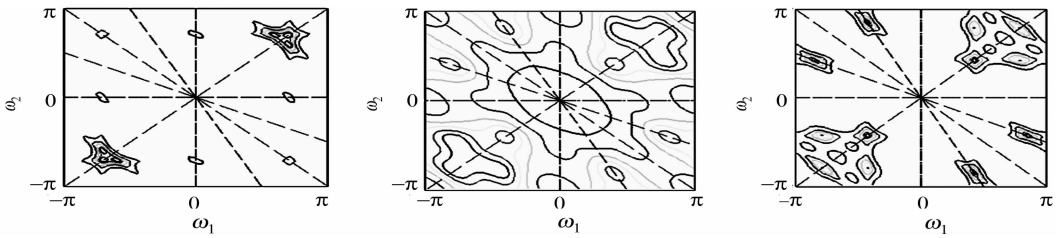
Fig. 3 Bispectrum diagonal slice in the vertical direction



(a) 正常 (b) 故障 1 (c) 故障 2

图 4 前后方向加速度振动信号的双谱图

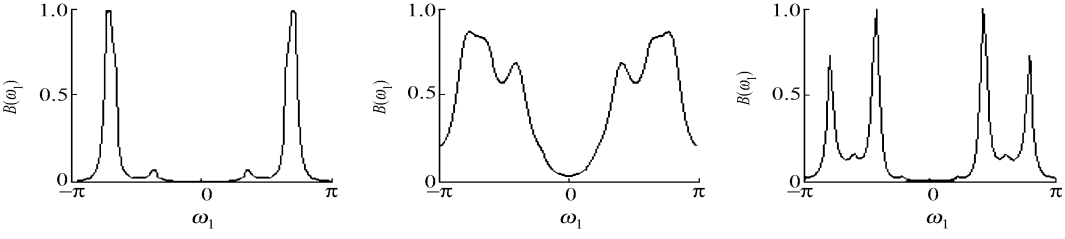
Fig. 4 Double spectrum of the acceleration vibration signal in the fore-and-aft direction



(a) 正常 (b) 故障 1 (c) 故障 2

图 5 前后方向的双谱等高线图

Fig. 5 Dual spectrum contour in the fore-and-aft direction



(a) 正常 (b) 故障 1 (c) 故障 2

图 6 前后方向的双谱对角切片图

Fig. 6 Bispectrum diagonal slice in the fore-and-aft direction

从图 1,4 中可以看出:电梯振动信号的双谱图都存在明显的谱峰;在正常情况下,垂直方向和前后方向加速度信号的双谱谱峰的数目都比较少,位置集中在两对角处,谱峰明显,小谱峰少;而故障 1 的情况,垂直方向和前后方向加速度信号的双谱图谱的谱峰分散在四角处,谱峰的数目较多,能量比较分散,小谱峰多;故障 2 的情况,垂直方向和前后方向加速度信号的谱峰数目较正常情况的多且分散,垂直方向信号的双谱谱峰在两对角处分散开来,有 3 个主峰,但谱峰和能量较故障 1 的集中,而前后方向信号的双谱谱峰分散在四角处,较故障 1 的峰陡且多。

从图 2,5 中可以看出:双谱的能量都集中在 $(-\pi, \pi)$ 之间,在正常情况下,能量较为集中,说明系统运行较平稳;在故障的情况下,由于系统运行的不平稳,能量较为分散;双谱的对角切片更直观的表达了峰值所对应的频率位置。

从图 3,6 中可以看出:谱峰所对应的频率位置都不同,故障 1 峰值所占的范围最窄,正常情况次之,

而故障 2 峰值所占的范围最宽；正常情况下峰值所占的范围最窄，故障 2 次之，而故障 1 峰值所占的范围最宽。

4 结论

- 1) 高阶谱能够抑制高斯信号，提取系统的特征信号，是处理非高斯，非线性的有效方法。AR 双谱谱峰的形状和分布反映了能量分布的差异，可以整体的观察电梯系统的动态特性。电梯在正常和故障工作时的 AR 双谱谱峰形状和分布差异明显。
- 2) AR 双谱的等高线和对角切片图更能直观地表达双谱的能量分布情况、谱峰的形状和谱峰所对应的频率位置，更能清晰分辨出正常工作和各故障之间的区别，可以很好的判断故障的存在。
- 3) 通过分析双谱、等高线及双谱对角切片差异，可以对电梯的故障进行有效地诊断。

参考文献：

[1] 张贤达. 时间序列分析：高阶统计量方法[M]. 北京：清华大学出版社，1996：6-13，20-24，52-55.

[2] 高宇，黄宜坚. AR 双谱在减压阀故障诊断中的应用[J]. 机械设计与制造，2011(11):70-72

[3] ZHANG Yan, WANG Shu-xun. Slice spectra approach to nonlinear phase coupling estimation[J]. Electronics Letters of IEEE, 1998, 34(4):340-341.

[4] 杨叔子，吴雅，轩建平，等. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2007：24-52，184-218，222-226.

[5] 柴茂，黄宜坚. 基于 AR 双谱的调速阀故障诊断[J]. 福州大学学报：自然科学版，2008, 36(6):825-830.

[6] 吴福森，黄宜坚. 砌块成形机液压振动信号的 AR 双谱分析[J]. 中国机械工程，2011, 22 (16):1954-1959.

[7] RAGH U M, NIKIAS C. Bispectrum estimation: A parametric approach[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 33(5):1213-1230.

[8] NIKIAS C L, RAGHUVeer M R. Bispectrum estimation: A digital signal processing framework[J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(7):869-891.

[9] 吕金虎，陆君安，陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉大学出版社，2001:114-183.

[10] 汤琴，黄宜坚. 采用 AR 模型双谱估计的概率筛筛分效率[J]. 华侨大学学报：自然科学版，2011, 32(3):253-257.

[11] 侯国屏，王珅，叶齐鑫，等. LabVIEW 7.1 编程与虚拟仪器设计[M]. 北京：清华大学出版社，2005:178-189.

AR Bispectrum in Fault Diagnosis of Elevator Machinery

CHEN Jian-can, LIU Xiao-mei

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The AR time series model is established through the acquisition of the acceleration vibration signals during the elevator running. The elevator mechanical fault diagnosis is analysed based on AR bispectrum, bispectrum contour and bispectrum diagonal slice. The results show that, the bispectrums in normal and faults are difference, AR bispectrum shows different characteristics, and it can be used as a mechanical fault diagnosis method.

Keywords: elevator; AR bispectrum; fault diagnosis; time series model

(责任编辑：陈志贤 英文审校：杨建红)